

Дослідження розладнання геометрії залізничної колії внаслідок нерівномірних осідань баластного шару

О. С. Набоченко, М. П. Сисин, В. В. Ковальчук, Ю. Є. Ковальчук,
А. Я. Пенцак, С. П. Брайченко

Розроблено метод розрахунку розладнання геометрії колії під дією динамічних навантажень при проходженні рухомим складом нерівності колії. Метод враховує взаємопов'язані короткотривалі процеси динамічної взаємодії та довготривалі процеси осідання баластного шару у взаємному впливі один на одного. В основі першої частини методу закладено математичну модель динамічної взаємодії колії у вигляді плоскої тришарової континуальної балкової системи у взаємодії із двохмасовою дискретною системою, що відповідає рухомому складу. Дана модель дозволяє імітувати динамічні навантаження від окремих шпал на баласт при проходженні рухомим складом геометричних нерівностей та нерівностей нерівнопружності колії.

В основі другої частини методу закладено феноменологічну математичну модель накопичення залишкових деформацій, яка ґрунтується на лабораторних дослідженнях осідань окремих шпал у баластному шарі. Особливістю даної моделі є врахування не тільки рівномірного накопичення залишкових осідань із пропущеним тоннажем, а також наявності пластичної складової осідання, яка залежить від максимальних напружень в історії навантажень баласту під кожною шпалою.

Запропоновано новий теоретичний механізм розвитку нерівності колії, який враховує не тільки залишкові осідання баластного шару, а також виникнення люфтів під шпалами, що призводить до локальної зміни пружності колії. Даний механізм дозволяє враховувати неоднозначний вплив осідань із виникненням люфту під шпалою. З однієї сторони, осідання спричиняють збільшення динамічних навантажень на колію і баластний шар, з іншої – виникнення люфту призводить до зменшення жорсткості колії та відповідного зменшення динамічних навантажень.

Практичне застосування розробленого методу показано на прикладі кількісної оцінки довготривалих нерівномірних осідань баластного шару при зміні епюри шпал

Ключові слова: залізнична колія, баластний шар, рухомий склад залізниць, геометрична нерівність колії

1. Вступ

На залізницях світу застосовуються два принципово різних типи залізничної колії: з баластовим шаром і безбаластною основою. Основними перевагами баластної колії є: відносно низькі будівельні витрати; легка заміна елементів колії; відносно легка корекція геометрії колії при поточному

утриманні; можливі невеликі корегування конфігурації плану залізничної колії; добрі дренажні властивості, пружність та поглинання шуму.

Рентабельність та економічність баластної колії залежить від оптимального підбору параметрів конструкції верхньої будови колії, при якому сумарні приведені капітальні та поточні витрати будуть мінімальними. В основі таких розрахунків лежить оцінка тривалості життєвого циклу колії та окремих її елементів.

Тривалість життєвого циклу баластної колії, насамперед, залежить від роботи одного з основних її компонентів, а саме, баластного шару. Баластний шар є елементом колії, який швидше за інші розладнується, та в першу чергу, вимагає поточного утримання. Причина цього полягає в тому, що баласт, на відміну від інших елементів верхньої будови колії, є сипким, незв'язним матеріалом, який вкрай погано сприймає динамічні навантаження. Нерівномірні осідання баластного шару приводять до розладнання геометрії колії, що в подальшому має вплив на життєвий цикл усіх елементів колії, внаслідок підвищених динамічних навантажень рухомого складу.

Механізм виникнення нерівності геометрії колії внаслідок накопичення залишкових деформацій баластного шару є складним та багатограним. На нерівномірні осідання баластного шару мають вплив багато факторів конструкції верхньої будови колії, властивостей земляного полотна, характеристик рухомого складу, умов експлуатації та місцевих атмосферних впливів [1].

Процес нерівномірного осідання колії є результатом взаємопов'язаних процесів осідання окремих шпал та перерозподілу навантаження між ними внаслідок виникнення люфта під окремими шпалами або їх групами. Осідання окремо взятої шпали, як відомо [2, 3], має швидку у часі «пластичну» складову та в'язку, яка залежить від пропущеного таннажу або кількості осей рухомого складу. Пластична складова осідань як правило має місце не тільки на початку життєвого циклу колії у період стабілізації баластного шару, але й упродовж нього, при умові виникнення росту навантажень на баласт [4, 5].

Зростання навантажень на баластний шар може виникати внаслідок ряду причин, основною з яких є зростання динамічного навантаження рухомого складу при виникненні нерівності колії. Друга причина пов'язана із явищем виникнення люфта під шпалою, тобто повної або часткової втрати опирання шпали на баласт. Виникнення люфта особливо помітне у місцях колії із значними локальними вібраційними, динамічними навантаженнями, такими як рейкові стики, хрестовини із жорстким осердям, короткі ізольовані нерівності поверхні кочення [6]. Збільшення напружень виникає на сусідніх шпалах відносно до шпал із люфтом внаслідок перерозподілу навантажень рейкошпальною решіткою. У загальному вплив люфта є неоднозначним. З однієї сторони, люфт розвантажує окремі шпали, а з іншої – призводить до виникнення додаткової пружної нерівності колії та збільшення динамічного навантаження.

Розглянута багатогранність та неоднозначність процесів нерівномірного осідання баластного шару та розладнання геометрії колії приводить до

складності моделювання та прогнозування цих процесів. На даний час не існує методики, яка б у повній мірі врахувала розладнання геометрії колії внаслідок нерівномірного осідання баластного шару. Існуючі методики, з однієї сторони, детально враховують фактори верхньої будови колії, рухомого складу та умов експлуатації у вигляді розрахункових напружень у методиці [7]. Але разом із цим введення допустимих значень напружень не дає можливості робити жодних висновків щодо циклів навантаження та міжремонтних термінів. З іншої сторони, методики на основі феноменологічних моделей [3, 8, 9–11], хоча й дають можливість прогнозування розладнання геометрії колії, але не враховують впливу факторів рухомого складу та колії.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідженням розладнання геометрії колії та стрілочних переводів було присвячено експериментальні та теоретичні роботи ряду авторів [1, 2, 8, 12].

Нерівномірне осідання баластного шару під шпалою чи брусом хрестовини стрілочного переводу чинить негативний вплив на усі елементи залізничної колії [1, 12]. Особливо це стосується елементів підрейкової основи, скріплень та шпал. При наявності значних нерівномірних осідань баластного шару (рис. 1) інтенсивно розладнуються елементи верхньої будови колії (рис. 2).

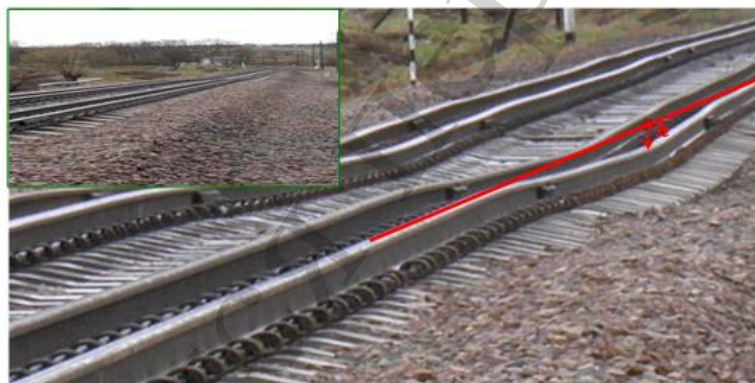


Рис. 1. Нерівність геометрії колії при осіданні щебеневого шару



Рис. 2. Дефекти, які виникають в шпалах у зоні геометричної нерівності колії

На даний час при проектуванні конструкцій колії або встановленні умов обертання рухомого складу працездатність баластового шару оцінюється розрахунковими напруженнями в баластному шарі та їх допустимими значеннями, які можуть мати різний рівень залежно від вантажнапруженості і типу рухомого складу. Такий підхід допустимих напружень є зручним при розв'язуванні практичних задач підбору конструкції та експлуатаційних умов, однак його основний недолік полягає в тому, що це допустиме значення безпосередньо не враховує тривалість служби баластного шару та кількість робіт поточного утримання.

Іншим підходом є не формулювання певних порогових напружень, а встановлення взаємозв'язку зміни цих напружень із кількістю навантажень. Такий підхід використано у дослідженнях AASHO-Road-Test [8] Американського Об'єднання Залізниць Штатів, згідно з яким збільшення навантаження на колію приводить до зменшення служби баластної колії по залежності четвертого степеню:

$$\frac{n_1}{n_2} = \left[\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right]^4, \quad (1)$$

де n_1, n_2 – кількість пропущених осей при напруженнях σ_1 та σ_2 , при яких розладнання досягає однакового рівня; σ_1, σ_2 – питоме навантаження (тобто розрахункове напруження) на баластний шар.

Так, наприклад, 10 % приріст навантаження є еквівалентним по розладнанню геометрії зменшенню кількості пропущених осей на 32 % [8].

Комітет ORE D141 розвинув метод кількісного розрахунку, при якому припускається, що розладнання геометрії колії є степеневою функцією навантаження відповідно до роботи [2]:

$$E = kT^\alpha P^\beta V^\gamma, \quad (2)$$

де E – зростання витрат на експлуатацію колії через розладнання після відновлення або останньої операції утримання; T – пропущений тоннаж; P – повне осьове навантаження (сума статичного та динамічного); V – швидкість руху; k, α, β, γ – константи. Параметри α, β були визначені емпірично ORE D141 та ORE D17.

Із наведених методик можна побачити значні розбіжності в оцінці впливу навантажень та напружень на розладнання геометрії колії. Це пояснюється тим, що дані методики були розроблені на основі узагальнення спостереження залізничної колії певної конструкції в певних експлуатаційних умовах. Крім експлуатаційних факторів не враховується жодного фактору конструкції верхньої будови колії. Разом з цим, на розладнання геометрії колії значний вплив мають також стан земляного полотна та вібраційний вплив рухомого складу [2].

У роботі [2] встановлено, що при ударі відбувається перерозподіл частинок баласту, а циклічне навантаження далі збільшує осідання розуцільненого баласту.

Також у роботі [2] встановлені зміни геометрії колії та її осідань в залежності від ступеню забрудненості баласту після пропуску 100000 осей з навантаженням 33 т/вісь. Дослідженням встановлено, що із збільшенням забруднення щебеню від 0 до 40 % колія починає прогресивно осідати, і разом з цим пропорційно збільшуються вертикальні нерівності.

Автори в роботі [9] пропонують статистичну модель прогнозування геометричного стану стрілочного перевалу на основі послідовного методу Монте-Карло. На відміну від стандартних феноменологічних моделей, такий метод дає можливість отримувати ймовірнісний результат розладнання геометрії, що ґрунтується на вихідних ймовірнісних величинах. Це, в свою чергу, дозволяє отримувати довший у часі прогноз стану колії, ніж при звичайних регресійних моделях.

У праці [13] представлено моделювання розладнання геометрії колії внаслідок диференційного осідання баласту та земляного полотна на основі ітераційного підходу розрахунку короткотривалої динамічної взаємодії та довготривалих процесів накопичення деформацій залізничної колії. Модель представлено одношаровою балковою схемою із пружними та в'язкими елементами підбалкових опор. Як результат показано форму нерівності осідання при різній кількості пропущених осей.

У роботі [3] показано, що змінна жорсткість нижньої будови колії грає визначальну роль стосовно погіршення геометрії колії, оскільки, з однієї сторони, вона приводить до підвищення динамічного навантаження колеса на колію, а з іншої сторони, є прямою причиною нерівномірних осідань баласту та земляного полотна. Встановлено, що причиною нерівномірних осідань баласту є неоднорідність баластної колії. Підбивочні машини для вирівнювання вертикального профілю тільки тимчасово його покращують; більше того, потрібні заходи, які значно впливають на жорсткість підрейкової основи.

У роботах [3, 13] автор спостерігав розвиток нерівностей на колії різних ділянок протягом 100 днів. Ним було встановлено, що погіршення геометрії колії залежить від: властивості нижньої будови колії; стану баластного шару; швидкості руху рухомого складу та згинальної жорсткості рейки. Встановлено, що середній приріст нерівностей становив від 0,16 мм до 1,08 мм на 100 днів.

До великомасштабних натурних випробувань слід віднести дослідження організації ORE D117 (Office for Research and Experiments of the International Union of Railways) [8], якою виконано спостереження розвитку зміни геометричного положення колії після пропуску експлуатаційного навантаження на коліях країн Чехословаччини, Франції, Польщі, Німеччини та Швеції. Встановлено, що відносна середньоквадратична похибка осідань та її зміна впродовж пропущеного тоннажу для різних ділянок залізниць є різною. Вона лежить в межах від 10 % до 40 %.

Лабораторні дослідження [4, 5] показали, що у залишковому осіданні баласту під окремою шпалою можна виділити дві складові – в'язку та

пластичну. Пластична складова характеризується швидким накопиченням деформацій та затуханням за відносно короткий початковий час стабілізації. В'язка складова має вплив лише при довготривалій дії навантаження, тобто при одночасному впливі фактору кількості пропущених осей.

Нерівномірне осідання баластного шару має два наслідки – появу геометричної нерівності колії та люфту під шпалою [14]. Вплив люфту є подвійним, з однієї сторони, він значно збільшує інтенсивність осідань, а з іншої сторони, приводить до виникнення додаткової нерівножорсткості колії. У результаті цього збільшується силова нерівність, яка разом з геометричною нерівністю утворюють нерівність на залізничній колії та стрілочних переводах. Таким чином, нерівномірне осідання має зворотній вплив через утворення люфту. З однієї сторони, він прискорює інтенсивність осідань, а з іншої, при достатній його величині, починає зменшувати тиск шпали на баласт аж до повного розвантаження.

Нерівність поверхні кочення рейки чинить додатковий зворотній вплив через додаткове динамічне навантаження та додатковий динамічний тиск шпал на баласт. Крім глибини осідання на динамічне навантаження має вплив довжина нерівності, що вважається незмінною та залежить лише від зовнішніх факторів конструкції колії і факторів рухомого складу. Для спрощення розрахунків, за параметр нерівності, який чинить вплив на динамічне навантаження, приймається ухил нерівності.

Із проведеного аналізу літературних даних можна стверджувати, що проблема прогнозування розладнання геометрії колії внаслідок нерівномірного осідання баластного шару не є повній мірі розв'язана у практичному та теоретичному плані. Найменш вивченими є довготривалі процеси виникнення нерівномірних залишкових деформацій у баластному шарі, які, в свою чергу, спричиняють порушення геометрії колії упродовж пропуску десятків млн. т вантажу. Вплив люфту при роботі шпал є ще менш дослідженим. Він пов'язаний із процесом перерозподілу навантажень від шпал на баласт та зміною динамічного навантаження від рухомого складу через зміну пружності колії.

Розв'язок теоретичної сторони проблеми тісно пов'язаний із практичною задачею встановлення кількісних взаємозв'язків між параметрами конструкції колії та їх вплив на довготривалі процеси розладнання. Актуальною практичною задачею є оцінка впливу епюри шпал на термін служби баластного шару та витрати утримання залізничної колії.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження впливу стану баластного шару на розладнання геометрії залізничної колії.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробити математичну модель взаємодії колії з рухомим складом залізниць із врахуванням в'язких та пластичних властивостей баластного шару, а також впливу на них вібраційного навантаження;
- розробити модель залишкового осідання баластного шару під дією багаторазових циклічних та короточасних динамічних навантажень;

– виконати моделювання впливу стану баласту на розладнання геометрії залізничної колії при різній епюрі шпал.

4. Методика прогнозування залишкових осідань баластного шару

Залишкові деформації колії чи вертикальні залишкові нерівності залежать від навантаження на колію від рухомого складу, його характеру та кількості. З іншої сторони, характер та величина навантаження, яке виникає при одноразовому проходженні по вертикальній нерівності, залежить від величини залишкової деформації баластного шару, яка викликає виникнення люфту та зміну пружності колії. Таким чином, існує зворотній зв'язок між даними факторами, який представлено на рис. 3.

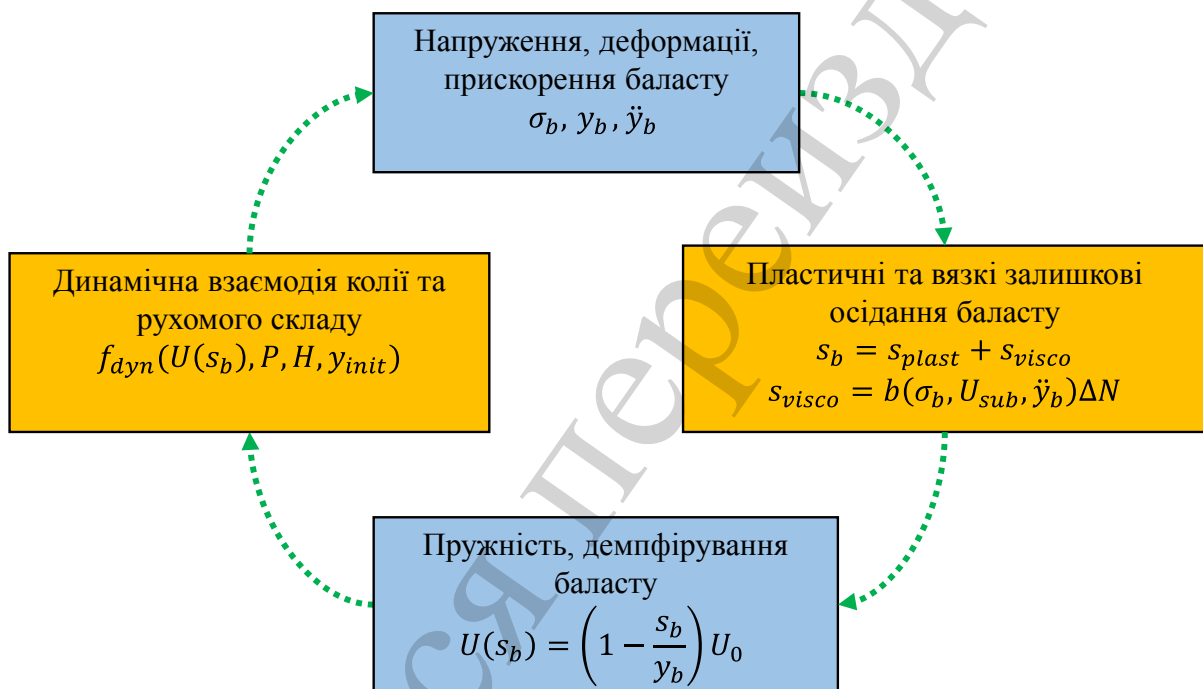


Рис. 3. Схема взаємозв'язку коротко- та довготривалих процесів у баластному шарі

Формально даний взаємозв'язок можна відобразити наступним чином. Початкова нерівність y_{init} певного невеликого значення викликає динамічну взаємодію колії та рухомого складу, яка в сумі із статичним навантаженням $P_{ст}$ складає силу дії на колію:

$$\{\sigma_b, \ddot{y}_b\} = f_{dyn}(U(s_b), P, H, y_{init}), \quad (3)$$

де P – характеристики рухомого складу та його швидкості; H – характеристика колії; σ_b – динамічні напруження у баласті; \ddot{y}_b – прискорення баластного шару; $U(s_b)$ – властивості пружності та демпфірування баластного шару і s_b – залишкові деформації баластного шару.

Залишкові деформації баластного шару в залежності від напружень, прискорень та кількості циклів навантажень встановлюються на основі експериментальних вимірів [15].

Поведінка осідання описується сумуванням пластичної частини s_{plast} (незалежного від часу пластичного осідання, первинного осідання) та в'язкої частини s_{visco} (незалежного від часу в'язкого осідання, вторинного осідання):

$$s_b = s_{plast} + s_{visco}. \quad (4)$$

Пластична частина осідання s_{plast} виникає раптово і, головним чином, у початковий період стабілізації колії. Складова пластичного осідання s_{Fmax} виникає тоді, коли напруження у баластному шару під шпалою σ_i є більшим від такого, що виникало до того часу в історії навантажень $MAX(\sigma_i)$. Величина $MAX(\sigma_i)$ була визначена за результатами лабораторних випробувань, що наведені у роботі [15], по навантаженню окремої шпали у шпальному ящику циклічним невібраційним навантаженням. Баласт розглядався максимально ущільненим на жорсткій підбаластній основі.

При кожному наступному випробуванні піднімалася амплітуда циклічного навантаження, у результаті чого збільшувався рівень початкових осідань. Повного розвантаження шпали не відбувалось. Взаємозв'язок початкових осідань та максимального навантаження представлено апроксимаційною залежністю у вигляді поліному другого степеню:

$$s_{plast} = s_{Fmax} = 42,953 \cdot \max(\sigma_i)^2 + 5,6844 \cdot \max(\sigma_i). \quad (5)$$

Максимальне значення складової пластичного осідання s_{Fmax} досягається протягом навантаження 1 млн. т. Для цього опису використовується асимптотична залежність осідання баласту в залежності від кількості навантажень [14, 15]:

$$s(N) = s_{Fmax} \frac{N}{a + bN}, \quad (6)$$

де N – кількість повторних навантажень; $a=10000$, $b=1$ – коефіцієнти, які залежать від напруженого стану та фізичних властивостей щебеню.

В'язка поведінка осідання s_2 залежить від кількості змін навантажень. На даний час існує велика кількість простіших та складних феноменологічних формул осідань [3, 4, 14, 15], які показують різні результати та які складно порівняти. Кінцевим результатом даного дослідження є не абсолютне значення осідання, а його різниця, тому для спрощеного опису в'язкої складової наближено прийнято лінійну залежність від кількості навантажень:

$$s_{visco} = b(\sigma_b, U_{sub}, \ddot{y}_b) \Delta N, \quad (7)$$

де ΔN – приріст кількості циклів навантажень; $b(\sigma_b, U_{sub}, \ddot{y}_b)$ – інтенсивність накопичення залишкових деформацій, що залежить від напруження у баластному шарі σ_i під шпалою, пружності земляного полотна U_{sub} та прискорень у баластному шарі \ddot{y}_b .

Інтенсивність $b(\sigma_b, U_{sub}, \ddot{y}_b)$ визначається, як добуток відповідних складових:

$$b(\sigma_b, U_{sub}, \ddot{y}_b) = b(\sigma_b) b(U_{sub}) b(\ddot{y}_b). \quad (8)$$

Складова від напружень у баласті визначається по емпіричній формулі поліному третього степеня, отриманої при обробці результатів експериментальних випробувань ВНИИЖТу [16] для чистого щебеню фракцій 25–60 мм:

$$b(\sigma_i) = 1,981\sigma_i^3 + 0,199\sigma_i^2 + 0,029\sigma_i \text{ (мм/10000 осей)}. \quad (9)$$

Складова від пружності земляного полотна визначається на основі досліджень [16]

$$b(U_{sub}) = k_U(U_s) = \frac{6000}{14U_s^{1,29} - 26} + 0,74. \quad (10)$$

Збільшення інтенсивності деформацій баластного шару внаслідок дії прискорень виводиться на основі експериментальних випробувань ВНИИЖТу [16], і описується простою залежністю:

$$b(\ddot{y}_b) = 1 + 0,5 \left(\frac{\ddot{y}_b}{9,81} \right)^{1,4}. \quad (11)$$

Вплив люфту на інтенсивність деформації баластного шару враховується в моделі через зміну пружності та демпфірування елементів моделі, що відповідають баластному шару. На даний час відомі різноманітні підходи до опису роботи люфту в моделях, що наведені у роботі [14]. У даному дослідженні, враховуючи багатогранність процесу взаємодії шпали із баластом у зоні люфту, прийнято наступну залежність:

$$U(s_b) = \left(1 - \frac{s_b}{y_b} \right) U_0, \quad (12)$$

де U_0 – початкові властивості пружності та демпфірування баластного шару; y_b – пружні деформації баластного шару.

Дане співвідношення дозволяє знижувати початкову пружність баластного шару при виникненні люфту, аж до нульового значення, якщо просідання більшим за пружний прогин.

Залежність (10) являє собою формальний запис функції взаємозв'язку напружено-деформованого стану колії та фізичних і геометричних характеристик колії та рухомого складу у певний період часу. Дана залежність відповідає часу взаємодії при проходженні через вертикальну нерівність колії. Тобто вона відображає короткотривалу взаємодію колії з рухомим складом. Залежності (1)–(8) відображають реологічну модель накопичення залишкових осідань у баластному шарі за тривалий час.

4. Розробка математичної моделі взаємодії залізничної колії з рухомими надресорною та неїдресорною масами

Для моделювання динамічної взаємодії колії з рухомим складом (рис. 4) за модель вагона прийнято узагальнену механічну систему. Дана система складається з двох інерційних тіл – надресорної та неїдресорної мас та відображає проходження однієї осі екіпажа. За модель колії вибрано модель із континуальних інерційних балок Ейлера з масою, зосередженою в осях балок.

Балки знаходяться одна на одній і розділені пружними континуальними шарами, які відповідають основі Вінклера та мають в'язко-дисипативні властивості. Нижня балка розміщується на нерухомій основі [16–19]. Кожна з балок відповідає конструктивним елементам: рейка, шпала зі скріпленням, баластний шар із земляним полотном. Дія окремих шпал описується через введення у верхньому з'єднувальному шарі проміжків із малим значенням жорсткості та демпфірування [20–22].

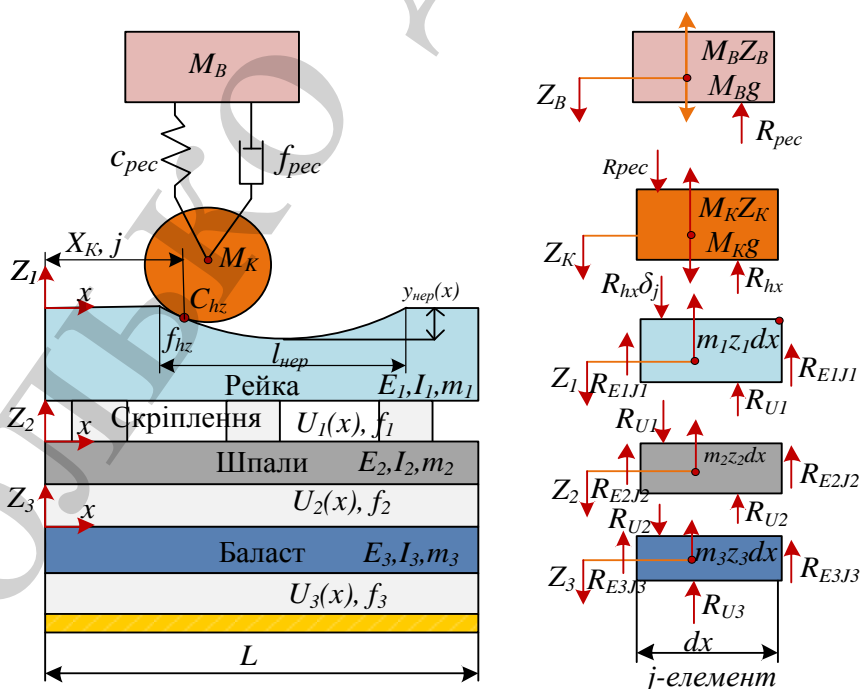


Рис. 4. Розрахункова схема взаємодії колії з рухомим складом

Об'єднання n_x елементів балки у загальну балку довжиною L приводить до системи диференціальних рівнянь n_x – степеня, яка у матричному вигляді записується наступним чином:

$$[M] \cdot \ddot{Z} + [C] \cdot \dot{Z} + [K] \cdot Z = P, \quad (13)$$

де P – матриця навантажень; $[M]$ – матриця мас елементів; $[C]$ – матриця демпфірування у з'єднуючих шарах; $[K]$ – матриця жорсткостей, що враховує згинальну жорсткість балки та жорсткість від опираючого; \ddot{Z} , \dot{Z} , Z – вектори прискорень, швидкостей та переміщень елементів балок відповідно.

Матриця мас $[M]$ має діагональну форму з ненульовою головною діагоналлю, вона складається з трьох квадратних блоків розміром $N \times N$ (N – кількість елементів, на які розбито кожен балку): $[M_1]$, $[M_2]$ та $[M_3]$, а також двох блоків розміром 1×1 M_B та M_K які відображають дискретні маси екіпажу:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [M_1] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [M_2] & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & [M_3] \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Матриця демпфірування $[C]$ має таку саму форму та розмір, як і матриця мас, однак до неї додаються додаткові діагональні елементи:

$$[C] = \begin{bmatrix} [f_{pec}] & -[f_{pec}] & 0 & 0 & 0 \\ -[f_{pec}] & [f_{hz}] + [f_{pec}] & -[f_{hz}] \cdot \delta_{1j} & 0 & 0 \\ 0 & -[f_{hz}] \cdot \delta_{1j} & [f_1] + [f_{hz}] \cdot \delta_{1j} & -[f_1] & 0 \\ 0 & 0 & -[f_1] & [f_2] - [f_1] & -[f_2] \\ 0 & 0 & 0 & -[f_2] & [f_3] + [f_2] \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Матриця жорсткості включає в себе, крім додаткових діагональних елементів у суміжних недиагональних блоках, також додаткові діагональні елементи біля головної діагоналі, через те, що в матрицю вводиться згинальна жорсткість. Матриця жорсткості має вигляд:

$$[K] = \begin{bmatrix} [C_{pec}] & -[C_{pec}] & 0 & 0 & 0 \\ -[C_{pec}] & [C_{hz}] + [C_{pec}] & -[C_{hz}] \cdot \delta_{1j} & 0 & 0 \\ 0 & -[C_{hz}] \cdot \delta_{1j} & [E_1 I_1 D^4] + [U_{1j}] + [C_{hz}] \cdot \delta_{1j} & -[U_{1j}] & 0 \\ 0 & 0 & -[U_{1j}] & [E_2 I_2 D^4] + [U_{2j}] + [U_{1j}] & -[U_{2j}] \\ 0 & 0 & 0 & -[U_{2j}] & [E_3 I_3 D^4] + [U_{3j}] + [U_{2j}] \end{bmatrix} \cdot (16)$$

У матрицях (13) та (14) є елементи, у складі яких є множник δ_{1j} ; це означає, що ненульовим елементом головної діагоналі є лише той, який відповідає точці контакту колеса та рейки. Оператор D^4 означає розкладання згинальної жорсткості у різницеву схему.

У векторі-стовпці зовнішнього навантаження P , крім гравітаційного навантаження, описується також функція сил від вертикальної нерівності за формулою:

$$P = \begin{bmatrix} M_B g \\ -C_{hz} \cdot [y_{\text{нер}}] \cdot \delta_{1j} - f_{hz} \cdot [\dot{y}_{\text{нер}}] \cdot \delta_{1j} + M_K g \\ C_{hz} \cdot [y_{\text{нер}}] \cdot \delta_{1j} + f_{hz} \cdot [\dot{y}_{\text{нер}}] \cdot \delta_{1j} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot (17)$$

Для розв'язку задачі потрібно знайти вектор переміщень елементів системи:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_B \\ Z_K \\ Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де Z_B – вектор переміщень надресорної маси вагона; Z_K – вектор переміщень непідресореної маси вагона; Z_1 – вектор переміщень елементів верхньої балки; Z_2 – вектор переміщень елементів середньої балки; Z_3 – вектор переміщень елементів нижньої балки.

Для розв'язку поставленої задачі необхідно ввести у розрахунок початкові та крайові умови, які мають наступний фізичний зміст: балки у будь-який момент часу є защемленими з країв, а швидкості усіх матеріальних точок дорівнюють нулю у початковий момент часу.

Початкові умови:

$$\begin{cases} z_g(0,t) = 0, \\ z_k(0,t) = 0, \\ z_1(x,0) = 0, \\ z_2(x,0) = 0, \\ z_3(x,0) = 0, \end{cases} \begin{cases} \dot{z}_g(0,t) = 0, \\ \dot{z}_k(0,t) = 0, \\ \dot{z}_1(x,0) = 0, \\ \dot{z}_2(x,0) = 0, \\ \dot{z}_3(x,0) = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Крайові умови на початку і на кінці ділянки:

$$\begin{cases} \frac{\partial z_1(0,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial z_2(0,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial z_3(0,t)}{\partial x} = 0, \end{cases} \begin{cases} z_1(0,t) = 0, \\ z_2(0,t) = 0, \\ z_3(0,t) = 0, \end{cases} \begin{cases} \frac{\partial z_1(L,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial z_2(L,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial z_3(L,t)}{\partial x} = 0, \end{cases} \begin{cases} z_1(L,t) = 0, \\ z_2(L,t) = 0, \\ z_3(L,t) = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Вибір крайових умов у вигляді системи (20) є найпростішим, однак він приводить до деяких незручностей при числовому розв'язанні задачі. Ці незручності пов'язані з так званою початковою ділянкою стабілізації коливального руху моделі, яка виникає внаслідок того, що початкові прогини приймаються нульовими, що не відповідає дійсності. У деяких задачах відкидають при подальшому розрахунку початкову ділянку стабілізації, коли переміщення, викликані початковими умовами, стають незначними. У даному випадку витрати часу на стабілізацію можуть займати значну частину часу моделювання. Тому для уникнення цього пропонується на першому кроці циклу розрахунку маси та демпфірування усіх елементів у рівнянні (17) встановити близькою до нуля. Таким чином, на першому кроці циклу розв'язується задача визначення статичних прогинів. При цьому не відбувається накопичення кінетичної енергії, як в інерційних елементах і коливання швидко приходять у стан рівноваги.

Оскільки у ролі крайових умов вибрано защемлення балок по обох кінцях, то прикладання зовнішнього навантаження поблизу країв також спричиняє похибку розрахунків. Для того, щоб уникнути цієї похибки розрахунку, яка пов'язана із прийнятими крайовими умовами, за початкову точку руху системи, що відображає екіпаж, приймається точка, віддалена від початку балки на відстань більше 4 м. На такій відстані навантаження від краю балки вплив защемлення на прогин складає менше 3 %. Точка завершення руху приймається також віддаленою від кінця балки на 4 м.

Практична реалізація розрахунку виконується за допомогою пакету програм Matlab [21]. Для прикладу розрахунку наведемо результати моделювання руху вагона ділянкою колії довжиною 25 м. При виконанні обчислень задавались наступні вихідні дані: $M_B=11600$ кг; $M_K=990$ кг; $m_1=65$ кг/м; $m_2=250$ кг/м; $m_3=700$ кг/м; $E_1=2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $I=3548 \cdot 10^{-8}$ м⁴;

$C_{\text{рес}}=80 \cdot 10^9$ Н/м. Швидкість руху системи 160 км/год. На колії є ізольована геометрична нерівність довжиною 1,0 м та глибиною 0,5 мм. Епюра шпал 1840 шт./км. Дискретизація часу пов'язана з кроком відстані, який приймається 0,05 м. Таким чином синусоїдальна нерівність описується 13 точками, що є достатнім для плавного відображення нерівності. У точці контакту колеса і колії зусилля змінюються неперервно, при цьому на нерівності збільшуються у залежності від параметрів нерівності.

Графік зміни коефіцієнта постелі елементів колії показано на рис. 5. Верхній шар є ступінчастим і відображає епюру шпал, коефіцієнти постелі середнього та нижнього шарів постійні. Усі ці величини приведені як інтенсивність навантаження, або сила дії на 1 м вздовж осі колії. Встановлено, що зусилля виникають лише у скріпленнях, у міжшпальному просторі зусилля відсутні. У шпало-баластному шарі та земполотні зусилля змінюються неперервно, при цьому у баласті виникає плавне збільшення тиску під шпалами і зменшення у міжшпальному просторі.

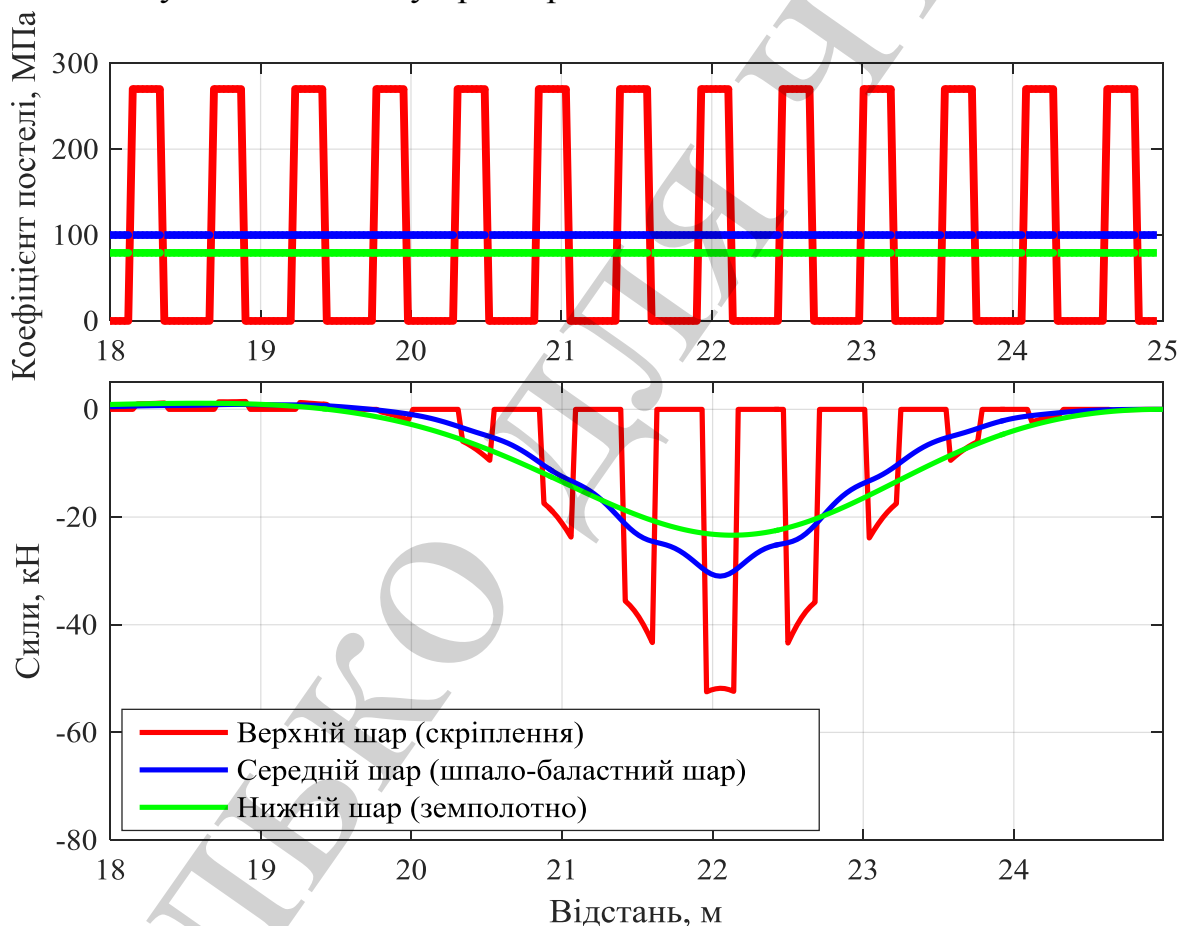


Рис. 5. Графік зміни коефіцієнтів постелі та сил для шарів скріплення, баласту і земляного полотна

Окрім параметрів напружено-деформованого стану колії у певний момент часу, також не менший інтерес представляє зміна цих параметрів у часі при проходженні рухомого навантаження по всій ділянці, а особливо в зоні нерівності. У зв'язку з цим у розрахунковій програмі передбачається отримання

результатів, що показують запис параметрів напружено-деформованого стану колії під точкою прикладення навантаження. Крім цього отримані сили, що виникають у точці контакту колеса і рейки (рис. 6). Для зручності візуалізації прогини рейки, баласту та земляного полотна розміщуються із різними початковими ординатами.

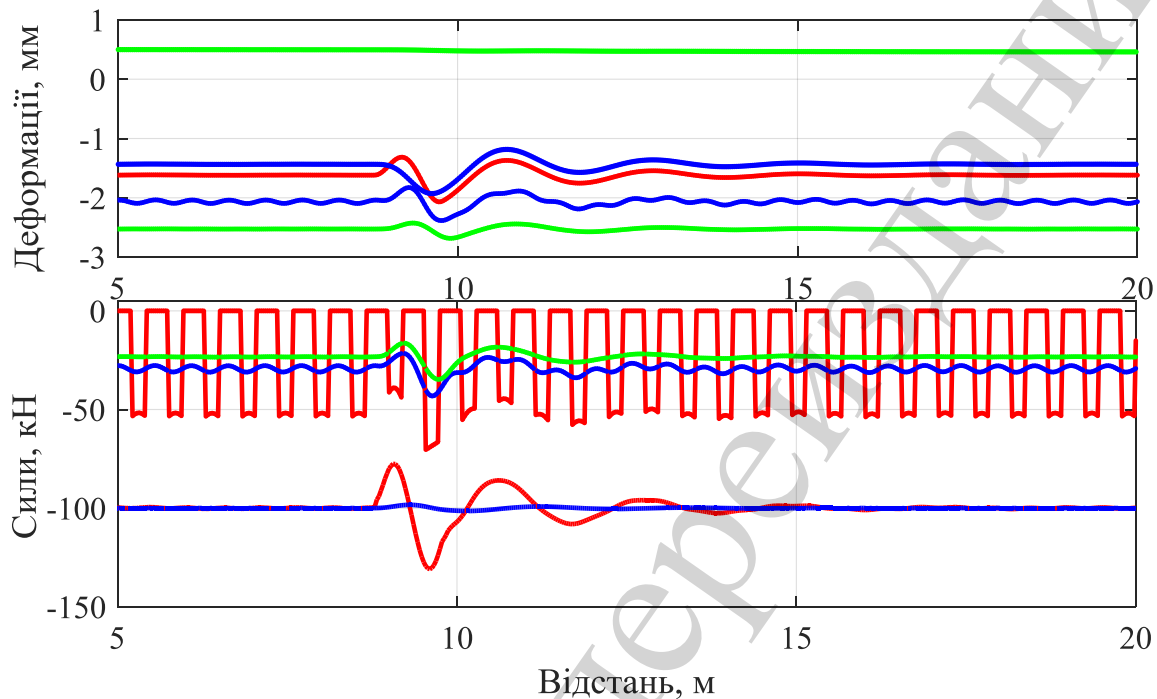


Рис. 6. Графіки траєкторії руху обресореної і непідресореної мас, прогинів елементів колії під точкою контакту колеса і рейки та відповідні навантаження

Як видно із рис. 6, динамічні деформації, що виникають у земляному полотні, становлять 0,3 мм, у баласті – 0,8 мм. Сили у контакті колеса і рейки досягають 137 кН. Отримані значення додаткових динамічних прогинів та навантажень відповідають отриманим за нормативними методиками розрахунку колії на міцність [7], тобто є адекватними для заданих вихідних даних.

На основі розробленої моделі короткотривалої динамічної взаємодії колії та рухомого складу, окрім швидкостей рухомого складу, осьових навантажень, надресорної та не підресореної мас, також можливо врахувати показники експлуатаційної якості ходових частин рухомого складу. Це можливо за рахунок введення геометрії контакту колеса та рейки, еквівалентної конічності, моделювання поперечних коливань колісних пар та візка.

5. Розрахунок залишкового осідання баластного шару під дією багаторазових циклічних та короткочасних динамічних навантажень

За наведеними вище методиками проведемо моделювання впливу стану баласту на розладнання геометрії колії при різній епюрі шпал. Результати моделювання показано у вигляді набору ліній, кожна з яких показує осідання колії після пропуску певної кількості осей навантаження. Для стандартної

епюри 1840 шт./км, осідання колії через розладнання баластного шару показано на рис. 7, для 1680 шт./км – на рис. 8 та для 1440 шт./км – на рис. 9.

Із рис. 7 видно, що розвиток осідання баластного шару збільшується із ростом пропущеного тоннажу. І відбувається одночасне загальне осідання колії, поряд із прискореним розвитком осідань поблизу нерівності. Розвиток нерівності відбувається не тільки безпосередньо у початковій нерівності, але й поза її зоною. При цьому нерівність поширюється, як за рухом навантаження, так і проти нього; початкова нерівність поступово згладжується і максимальне її значення зміщується відносно початкового напрямку руху навантаження.

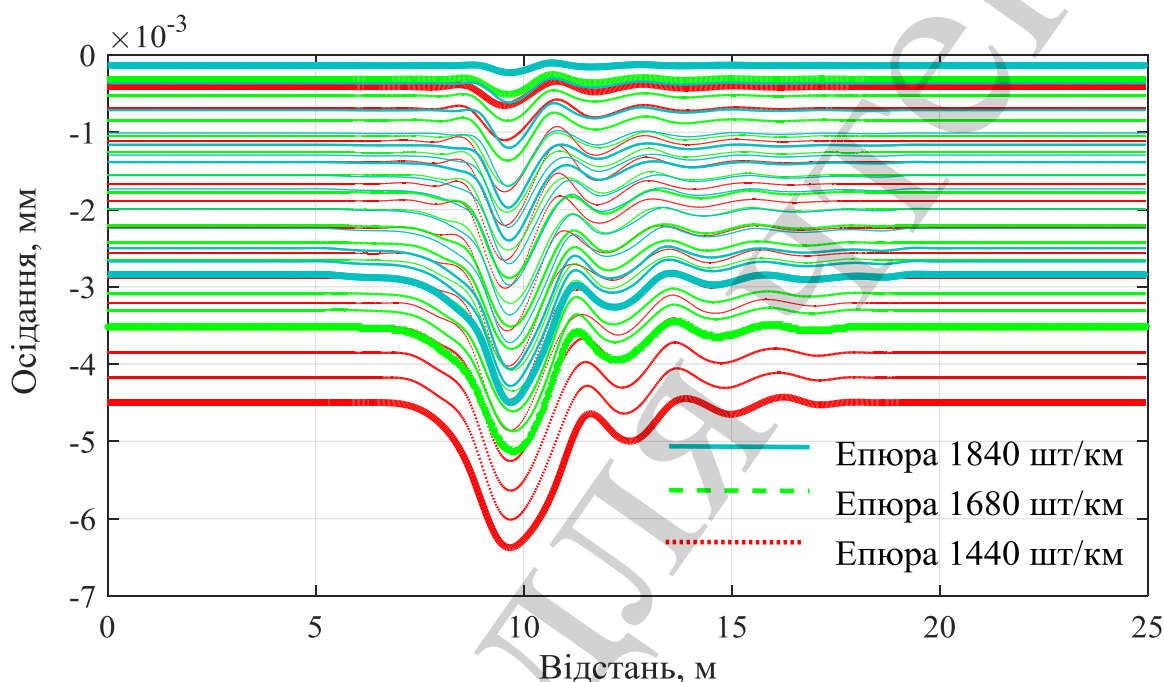


Рис. 7. Розвиток осідання баластного шару протягом пропуску 2 млн. осей при епюрах шпал 1840 шт./км, 1680 шт./км та 1440 шт./км

Згідно розробленої моделі, якщо осідання баластного шару не компенсуються пружними прогинами рейок та шпал, то вони викликають нерівномірну зміну пружності вздовж колії. На рис. 8 показано графік розподілу пружності на колії з епюрою 1840 шт./км після пропуску 2 млн. осей. При положенні геометричної нерівності 9,27 м $\pm 0,5$ м, хвиля суттєвого зниження пружності знаходиться переважно з правої сторони від вихідної нерівності і досягає 6 м. Зменшення пружності внаслідок виникнення люфту приводить до менш інтенсивного накопичення деформацій у зоні геометричної нерівності та до посиленого росту по краях нерівності осідань.

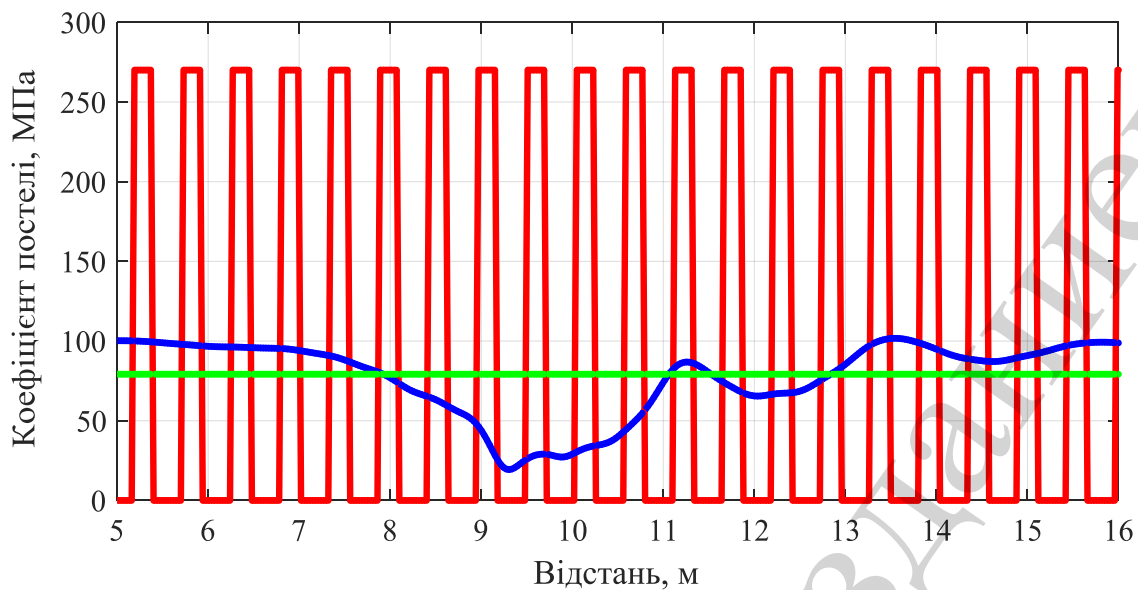


Рис. 8. Графік розподілу пружності на колії з епюрою 1840 шт./км після пропуску 2 млн. осей

Така нерівнопружність проявляється у вигляді нерівномірного прогину рейок при прокочуванні колеса, що призводить до виникнення силової нерівності під навантаженням. Для оцінки впливу осідань баластного шару на силову нерівність колії, виконується розрахунок деформацій при наявності тільки статичного рухомого навантаження. На рис. 9 показано пружне осідання рейки без геометричної нерівності під статичним рухомим навантаженням на колії з епюрами 1840 шт./км, 1680 шт./км і 1440 шт./км після пропуску 0, 5000, 50000, 500000, 1000000, 2000000 осей.

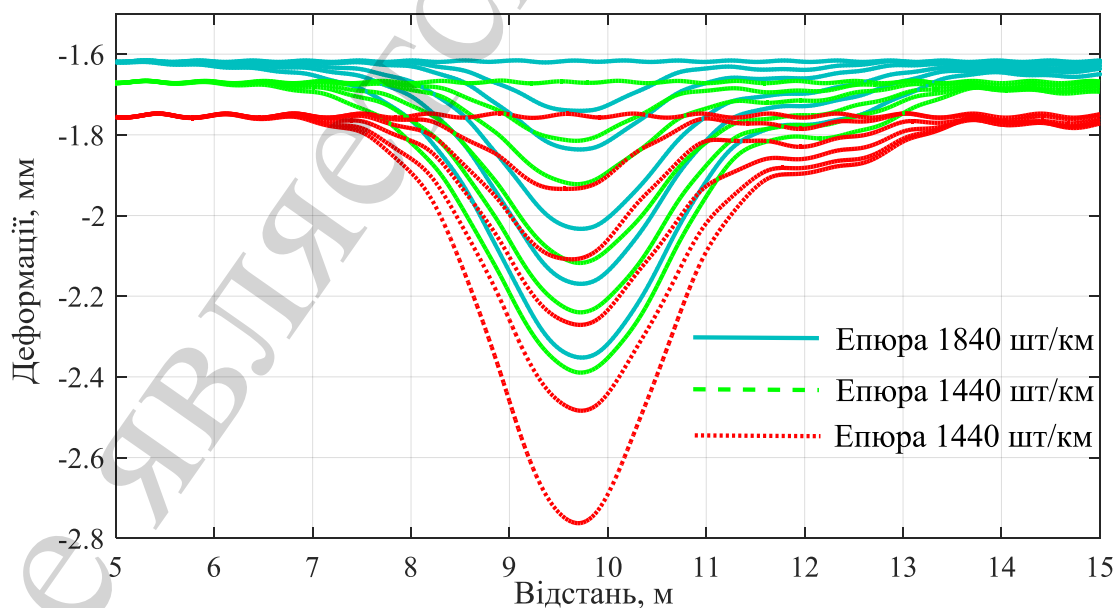


Рис. 9. Графік пружних осідань під статичним рухомим навантаженням на колії з епюрами 1840 шт./км, 1680 шт./км та 1440 шт./км після пропуску 0, 5000, 50000, 500000, 1000000, 2000000 осей

Для оцінки рівня силової взаємодії показується зміна напружено-деформованого стану колії на кінцевій нерівності при епюрах 1840 шт./км, 1680 шт./км і 1440 шт./км та на нерівностях, що виникли після пропуску 2 млн. осей. Порівняння здійснюється по максимальних значеннях величин, які виникають через динамічні коливання. Результати порівнянь силової дії екіпажа на колію при різних епюрах наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння силової дії екіпажа на колію при епюрах 1840 шт./км, 1680 шт./км і 1440 шт./км на нерівності, яка виникла після пропуску 2 млн. осей

Показники	Епюра 1840 шт./км	Епюра 1680 шт./км	%	Епюра 1440 шт./км	%
Нормальні напруження у рейці σ , МПа	68,3	72,95	6	85,32	25
Сила дії шпали на баласт P_b , кН	42,82	48,05	11	58,89	38
Сила дії колеса на рейку P_p , кН	120,4	130,1	8	139,7	16
Інтенсивність розвитку нерівності, мм/1 млн. т	0,149	0,183	23	0,266	79

На рис. 10 показано зміну глибини нерівності протягом всього пропущеного тоннажу при трьох варіантах епюри.

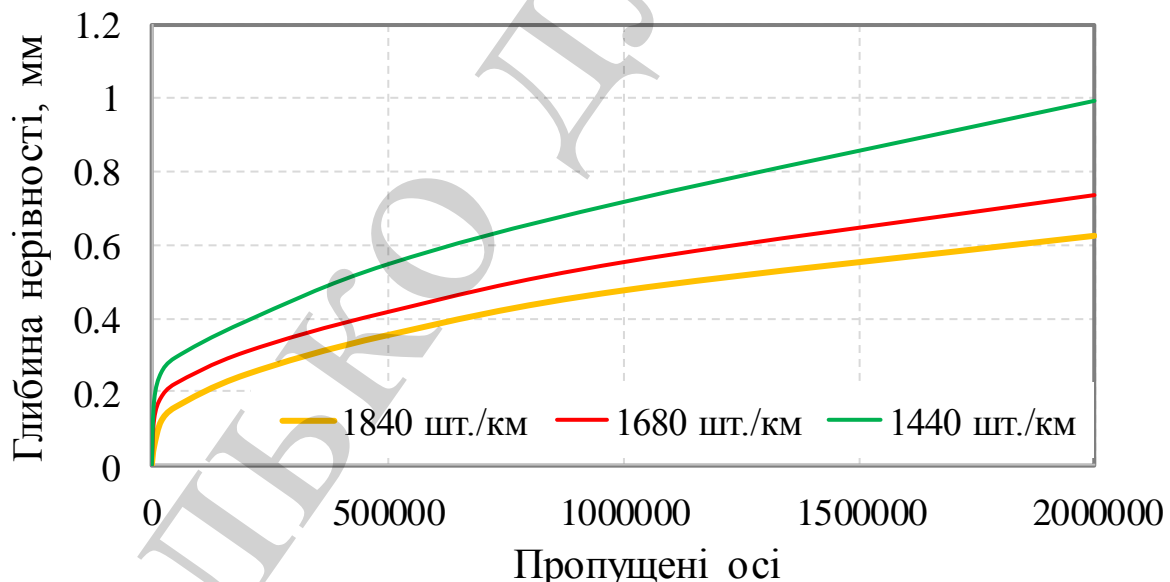


Рис. 10. Графік залежності глибини нерівності внаслідок розладнання баластного шару від кількості пропущених осей та вантажу для епюр 1440 шт/км, 1840 шт/км та 1680 шт/км

Незважаючи на досить малу різницю між нерівностями при різних епюрах, цій різниці відповідають великі значення пропущеного тоннажу. Розвиток

нерівності при епюрі шпал 1440 шт./км є значно швидшим, ніж 1680 шт./км та при епюрі 1840 шт./км. І тоді, коли нерівність при епюрі 1840 шт./км досягає певної глибини після пропуску 2 млн. осей, така сама глибина нерівності на колії з епюрою 1680 шт./км досягається після пропуску 1,38 млн. осей, а при епюрі 1440 шт./км – після 0,65 млн. осей. Подібний висновок отримано і за результатами розрахунку при статичному навантаженні з використанням закону четвертого-степеня [4, 13, 14], при якому розладнання прискорюється на 34 %, при збільшенні тиску на баласт на 11 %, при переході до епюри 1680 шт./км. При переході до епюри 1440 шт./км термін між підбивками баласту скорочується до 32 %, порівняно з епюрою 1840 шт./км.

6. Обговорення результатів дослідження з метою формування оцінки стану міцності колії

Залишкові деформації баластного шару викликають появу люфтів по краях шпал, які можуть перерости у повну втрату контакту нижньої поверхні шпали із баластом. У залежності від діючих на колію навантажень та деформацій рейок та шпал можливі різні випадки контакту. Люфт може повністю зімкнутися під навантаженням, при достатньо значних навантаженнях, які викликають переміщення шпал, що є більшими за осідання баласту. При менших навантаженнях можливе не повне закриття люфту, або й відсутність контакту. Таким чином, люфт під шпалою чинить значний вплив на перерозподіл навантаження на сусідні шпали.

Приймається, що нерівність на колії внаслідок осідань баластного шару при невеликих швидкостях руху приводить лише до появи додаткового динамічного тиску на баласт, а впливу на вібраційну дію не має. Також внутрішні фактори чинять взаємний вплив один на одного, наприклад, фактор вібраційного навантаження має вплив на інтенсивність накопичення осідань лише при наявності фактора тиску на баластний шар, але не навпаки.

Незважаючи на досить малу різницю між нерівностями при різних епюрах шпал, цій різниці можуть відповідати досить великі значення пропущеного тоннажу. Це показує графік росту глибини нерівності від пропущеного тоннажу для різних епюр шпал. Розвиток нерівності при епюрі шпал 1680 шт./км є швидшим, ніж при епюрі 1840 шт./км, та значно швидший при епюрі 1440 шт./км. Тоді, коли нерівність при епюрі 1840 шт./км досягає певної глибини після пропуску 2 млн. осей, така сама глибина нерівності на колії з епюрою 1680 шт./км досягається після пропуску 1,38 млн. осей, а при епюрі 1440 шт./км – після 0,65 млн. осей. Прискорений розвиток нерівності при переході на рідшу епюру пояснюється двома причинами: непропорційно швидким зростанням інтенсивності накопичень залишкових осідань при збільшенні тиску на баластний шар. Другою причиною є швидке зростання динамічних навантажень на колію, при рості нерівності колії.

Немаловажну роль грає початкова геометрична нерівність колії, яка, незважаючи на порівняно малі розміри, викликає вібраційне динамічне навантаження, яке, в свою чергу, підсилює інтенсивність накопичення залишкових деформацій. Актуальною задачею подальших досліджень є

встановлення допустимих меж утримання колії та експлуатаційних умов для конструкції з розрідженою епюрою шпал, при яких інтенсивність розладнання була б все ще на прийнятному рівні. Так, наприклад, вчасне усунення геометричних нерівностей на рейках засобами шліфування та наплавки, могло б попередити розвиток нерівності внаслідок осідань баластного шару і значно віддалити термін наступної підбивки колії. Особливо це стосується розрідженої епюри шпал 1440 шт./км, яка, за результатами даного дослідження, є вкрай чутливою до динамічних навантажень.

З точки зору практичного використання, розроблена схема розрахунку має обмеження. Ці обмеження полягають у складності визначення й задання фактичних значень забрудненості баластного шару і його вологості та задання величини коротких нерівностей, які викликають ударно-вібраційну дію. Отримані результати в сукупності мають суттєве значення для колійного господарства залізничного транспорту.

7. Висновки

1. Розроблено методику прогнозування розладнання геометрії колії, яка, на відміну від існуючих методик, враховує зміну напружено-деформованого стану баластного шару у залежності від конструкції колії, пружності земляного полотна, вібраційної дії рухомого складу, тощо. Це дозволяє у подальшому значно розширити коло задач застосування даної методики на наступні актуальні задачі: оптимальний підбір параметрів конструкції колії для заданих експлуатаційних умов, встановлення допустимих швидкостей та навантажень рухомого складу для забезпечення прийнятних міжремонтних термінів, тощо. Існуючі методики, які не диференціюють вплив конструкції колії, земляного полотна та особливостей дії рухомого складу, не дають можливості у повному обсязі розв'язати дані задачі.

2. Процес розладнання геометрії колії у зоні короткої геометричної нерівності супроводжується нерівномірними осіданнями рейко-шпальної решітки із виникненням люфту під окремими шпалами. Це призводить до зміни пружності вздовж колії, що викликає сповільнення росту динамічних навантажень у зоні люфту. Одночасно із цим відбувається перерозподіл навантажень на сусідні з люфтом шпали. Такий підхід дозволяє пояснити розвиток нерівності не тільки безпосередньо у початковій нерівності, але й поза її зоною. При цьому нерівність поширюється, як за рухом навантаження, так і проти нього; початкова нерівність поступово згладжується і максимальне її значення зміщується відносно початкового напрямку руху навантаження.

3. За розробленою методикою розрахунку розраховано розладнання геометрії колії внаслідок осідання баластного шару при розрідженні епюри шпал. При переході до епюри 1440 шт./км, статичне навантаження від шпал на баласт збільшується на 21 % та скорочується термін між підбивками баласту до 32 %, порівняно з епюрою 1840 шт./км.

Література

1. The complex phenomenological model for prediction of inhomogeneous deformations of railway ballast layer after tamping works / Sysyn M., Gerber U., Kovalchuk V., Nabochenko O. // Archives of Transport. 2018. Vol. 47, Issue 3. P. 91–107. doi: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.6512>
2. Lichtberger B. Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003. 562 p.
3. Lichtberger B. Track Compendium. Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG, 2005. 634 p.
4. Gerber U. Setzungsverhalten des Schotters // Železniční dopravní cesta. Sborník přednášek. Decin, 2010. P. 117–122.
5. Gerber U., Fengler W. Setzungsverhalten des Schotters // Eisenbahntechnische Rundschau. 2010. Issue 4. P. 170–175.
6. Theoretical study into efficiency of the improved longitudinal profile of frogs at railroad switches / Kovalchuk V., Sysyn M., Sobolevska J., Nabochenko O., Parneta B., Pentsak A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4, Issue 1 (94). P. 27–36. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139502>
7. Даніленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість (ЦП/0117). Затверджено наказом Укрзалізниці від 13.12.2004 р. № 960 ЦЗ. Київ: Транспорт України, 2006. 168 с.
8. Esveld C. Modern railway track. MRT-Production, 2001. 653 p.
9. Particle filter-based prognostic approach for railway track geometry / Mishra M., Odelius J., Thaduri A., Nissen A., Rantatalo M. // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 96. P. 226–238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.04.010>
10. Fischer S. Breakage test of railway ballast materials with new laboratory method // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017. Vol. 61, Issue 4. P. 794–802. doi: <https://doi.org/10.3311/ppci.8549>
11. Németh A., Fischer S. Investigation of glued insulated rail joints with special fiber-glass reinforced synthetic fishplates using in continuously welded tracks // Pollack Periodica. 2018. Vol. 13, Issue 2. P. 77–86. doi: <https://doi.org/10.1556/606.2018.13.2.8>
12. Sysyn M. P., Kovalchuk V. V., Jiang D. Performance study of the inertial monitoring method for railway turnouts // International Journal of Rail Transportation. 2018. P. 1–14. doi: <https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1514282>
13. Nielsen J. C. O., Li X. Railway track geometry degradation due to differential settlement of ballast/subgrade – Numerical prediction by an iterative procedure // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 412. P. 441–456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.10.005>
14. Holtzendorff K. Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen. Dissertation. Technische Universität Berlin. Berlin, 2003. 130 p.
15. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. 589 с.

16. Die Instandhaltung der Bettung / Nabochenko O., Sysyn M., Gerber U., Rybkin V. // *Železniční Dopravní Cesta*. Děčín, 2011. P. 23–32.
17. Dynamical response of railway switches and crossings / Salajka V., Smolka M., Kala J., Plášek O. // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 107. P. 00018. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700018>
18. Estimation of carrying capacity of metallic corrugated structures of the type Multiplate MP 150 during interaction with backfill soil / Kovalchuk V., Kovalchuk Y., Sysyn M., Stankevych V., Petrenko O. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, Issue 1 (91). P. 18–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123002>
19. Kassa E. Dynamic train-turnout interaction: mathematical modelling, numerical simulation and field testing. Chalmers University of Technology, Göteborg, 2007.
20. Мямлин С. В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. Днепропетровск: Новая идеология, 2002. 240 с.
21. Метьюз Д. Г., Финк К. Д. Численные методы. Использование MATLAB. М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. 720 с.